**Journal of Water and Soil**
https://jsw.um.ac.ir

**Research Article**
**Vol. 36, No. 2, May-June 2022, p. 185-196**

# Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model

**B. Sadeghi[1], B. Farhadi Bansouleh[2]*, A. Bafkar[3], M. Ghobadi[4]**

| | |
|---|---|
| Received: 22-01-2022<br>Revised: 07-02-2022<br>Accepted: 10-04-2022<br>Available Online: 21-07-2022 | **How to cite this article:**<br>Sadeghi B, Farhadi Bansouleh B., Bafkar A., and Ghobadi M. 2022. Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model. Journal of Water and Soil 36(2): 185-196. (In Persian with English abstract)<br>**DOI:** 10.22067/JSW.2022.74628.1133 |

## Introduction

The rapid growth of the world's population, followed by an increase in the need for water, has put great pressure on water resources, so it is necessary to plan for the optimal use and increase of efficiency of this vital resource. Sunflower is one of the most important oilseed crops that is mainly cultivated in Kermanshah province. Therefore, determining the appropriate sowing time of this crop for maximum production and water use efficiency is of particular importance. Because field experiments are costly and time-consuming, researchers use crop growth simulation models to determine the optimal planting time for each crop in a specific environment and climate. The use of simulation models minimizes the limitations of field experiments and allows the analysis of plant responses to environmental stresses and management scenarios. The objective of this study was to determine the optimal planting date of the Farrokh sunflower cultivar in four regions of Kermanshah province (Kermanshah, Islam Abad, Sarpol Zahab, and Kangavar) in order to maximize yield and water use efficiency using the AquaCrop model.

## Materials and Methods

A field experiment was conducted at the Research Farm of Razi University, Kermanshah, Iran in order to calibrate and validate the crop parameters in the AquaCrop model. The experiment was performed in a randomized complete block design with eight irrigation treatments in three replications. The irrigation treatments were the application of 60, 80, 100, and 120% of irrigation requirement (T1, T2, T3, and T4), 20 and 40% deficit irrigation in vegetative phase (T5 and T6), and 20 and 40% deficit irrigation in reproductive phase (T7 and T8). The crop water requirement was calculated based on the daily weather data collected from an automated meteorological station at the Research Farm using the FAO Penman-Monteith equation. During the growing season, canopy cover, biomass, and soil moisture were measured weekly. The crop parameters were calibrated based on the measured data in treatments T1, T3, T6, and T7 and validated with four treatments T2, T4, T6, and T8. In the calibration and validation stages, the statistical indices including compatibility index (d) and root mean square error (RMSE) were used to evaluate the model outputs. The calibrated model was used to simulate crop growth based on daily weather data for 30 years (1988-2017) in four synoptic stations in Kermanshah province (Kermanshah, Islam Abad, Sarpol Zahab, and Kangavar) and for several different planting dates. The crop water productivity was calculated based on simulated grain yield and seasonal crop evapotranspiration. Finally, the model outputs under different planting dates were analyzed to determine the most appropriate planting time from the perspective of maximum production and maximum water use efficiency.

## Results and Discussion

Statistical indicators show that the model has simulated the parameters of biomass, crop canopy, and soil moisture in the calibration stage with good accuracy. T1 and T6 treatments in biomass simulation, T7, T6, and

1, 2 and 3- Gratuated M.Sc and Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: bfarhadi2001@yahoo.com)
4- Associate Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Razi University, Kermansh, Iran

T3 treatments in crop canopy simulation, and T3 and T7 treatments in soil moisture simulation had the highest accuracy. The accuracy of the model outputs in the validation stage for biomass and canopy cover was as accurate as in the calibration stage, while the accuracy of the simulated soil moisture in the validation stage was not high except in T4 treatment. Based on the model results, grain yield, seasonal evapotranspiration and water productivity were determined. According to the results, it can be said that in the study period (1988 -2017), grain yield has generally increased with a slight slope. The results showed that the planting date, which maximizes grain yield and water productivity, varies in the studied regions. According to the model results, planting in the second decade of May and the second decade of June will lead to the highest grain yield and water productivity in Kermanshah, respectively. Planting in the third decade of May showed the highest grain yield and crop water productivity in Islam Abad. In Sarpol Zahab, which has the highest temperature among the studied stations, planting in the last decade of March and the first decade of April has the highest grain yield and water productivity, respectively. In Kangavar, which is located in the east of Kermanshah province and has the coldest climate, by cultivating sunflower in the last decade of May and the first decade of June, respectively, the highest grain yield and water productivity can be achieved.

## Conclusion

Due to the fact that some crop parameters of crop growth simulation models are variety specific, in this study, the crop parameters of the AquaCrop model for Farrokh sunflower cultivar were calibrated and validated. The accuracy of the calibrated model for estimating biomass and canopy cover was higher than soil moisture. The simulation results showed that the values of the studied parameters (grain yield and seasonal evapotranspiration) have changes according to the planting time in each region. The highest crop yield can be obtained in Sarpol Zahab, Islam Abad, Kermanshah, and Kangavar regions (west to east of the province) by cultivation in the last decade of March, last decade of April, the second decade of May, and last decade of May, respectively. In all study areas except Islamabad, planting date that resulted in maximum water productivity was different from the planting date that had maximum grain yield station and delayed planting had the highest water productivity.

**Keywords:** AquaCrop, Planting date, Productivity, Simulation, Sunflower

**نشریه آب و خاک**
https://jsw.um.ac.ir

**مقاله پژوهشی**
جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص۱۹۶-۱۸۵

# بررسی تاثیر تاریخ کشت روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آفتابگردان با استفاده از مدل AquaCrop

**بهناز صادقی[1]- بهمن فرهادی بانسوله[2]*- علی بافکار[3]- مختار قبادی[4]**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

## چکیده

زمان کشت یکی از عواملی است که روی میزان آب مصرفی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاهان تأثیرگذار است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه، ابزارهای مفیدی برای ارزیابی تأثیر تاریخ کشت روی پارامترهای مورد اشاره و تعیین زمان مناسب کشت می‌باشند. در این مطالعه به‌منظور تعیین تاریخ مناسب کشت آفتابگردان در استان کرمانشاه از مدل AquaCrop استفاده شد. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای گیاهی مدل AquaCrop آزمایشی مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هشت تیمار (تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی در کل دوره رشد و تیمارهای ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره رویشی و دوره زایشی) در سه تکرار اجرا گردید. رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از مدل واسنجی شده، براساس آمار هواشناسی ۳۰ ساله (۲۰۱۷–۱۹۸۸) برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) و برای چند تاریخ کشت مختلف شبیه‌سازی گردید. مقادیر عملکرد دانه، تبخیر و تعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب بر اساس خروجی‌های مدل AquaCrop تعیین گردید. نتایج بیانگر این بود که با توجه به تغییرات پارامترهای هواشناسی در ۳۰ سال مورد بررسی، عملکرد پتانسیل دانه در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی بوده است. همچنین نتایج نشان داد تاریخ کشت مناسب که منجر به بالاترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب می‌شود در مناطق مختلف متفاوت است. مناسب‌ترین تاریخ کشت به‌منظور دستیابی به حداکثر عملکرد دانه در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به‌ترتیب دهه‌های اول فروردین، دوم اردیبهشت، سوم اردیبهشت و اول خرداد تعیین گردید. دهه‌های دوم فروردین، اول اردیبهشت، سوم خرداد و دوم خرداد از نظر بهره‌وری مصرف آب مناسب‌ترین تاریخ کشت برای آفتابگردان به ترتیب در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور تعیین شد.

**واژه‌های کلیدی:** آفتابگردان، بهره‌وری، تاریخ کشت، شبیه‌سازی، مدل AquaCrop

## مقدمه

برنامه‌ریزی در جهت استفاده بهینه از منابع آب و افزایش بهره‌وری به‌خصوص در بخش کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. با اعمال مدیریت صحیح در سیستم آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش محصول، یک کشاورزی پایدار ایجاد نمود. تاریخ کاشت عامل مهمی است که بر طول دوران رشد رویشی و زایشی گیاهان و نهایتاً کیفیت و کمیت محصول تولیدی تأثیر می‌گذارد. دما، نور خورشید و سایر عوامل هواشناسی به شکل منفرد یا همراه باهم رشد و تولید گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و با تغییر در تاریخ کاشت، پارامترهای هواشناسی نیز در طول دوره رشد تغییر می‌کنند. همچنین تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی گیاه و کل تولید زیست‌توده را کنترل نموده و در کارایی تبدیل زیست‌توده به عملکرد مؤثر است (Khichar and

---

۱، ۲ و ۳ – به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی و استادیاران گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: bfarhadi2001@yahoo.com)
۴- دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.74628.1133

Niwas, 2006). به‌طورمعمول، در هر منطقه برای کشت هر گیاه یک بازهٔ زمانی در نظر گرفته می‌شود (Rao *et al.*, 2001 ). مطالعات متعددی در مناطق مختلف برای تعیین بازه زمانی مناسب کشت محصولات انجام شده است (۹). با توجه به اینکه آزمایش‌های مزرعه‌ای پرهزینه و زمان‌بر هستند و در برخی شرایط امکان‌پذیر نمی‌باشند، محققان از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول برای تعیین تاریخ کاشت بهینه محصولات در شرایط محیطی خاص استفاده می‌کنند (Khaleghi, 2019). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات میدانی را به حداقل رسانده و امکان تحلیل واکنش گیاه به تنش‌های محیطی و سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌کند (Oiganji *et al.*, 2016). لازم به ذکر است که مدل‌ها به‌طور کامل نمی‌توانند جایگزین مطالعات مزرعه‌ای شوند و استفاده ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های مزرعه-ای راهکار قابل قبولی می‌باشد (Farahani *et al.*, 2009). دقت نتایج حاصل از مدل‌ها به‌دقت داده‌های ورودی بستگی دارد. در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها قادر به ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات دراز مدت آن خواهند بود (Mohammadi *et al.*, 2015 ; Farahani *et al.*, 2009 ). مدل-های شبیه‌ساز رشد گیاهی با شبیه‌سازی محیط مورد نظر، امکان پیش‌بینی آنچه در مزرعه رخ خواهد داد را فراهم می‌کنند. آفتابگردان یکی از محصولات مهم کشاورزی در ایران و استان کرمانشاه می‌باشد که در سطح نسبتاً وسیعی کشت می‌شود. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، حدود ۱۷ درصد سطح زیرکشت آفتابگردان آجیلی در استان کرمانشاه کشت می‌شود. گیاه آفتابگردان در محدوده وسیعی از تاریخ‌های کشت رشد می‌کند، اما تاریخ کشت بهینه باعث انطباق مراحل رشد گیاه با شرایط مطلوب محیطی شده و موجب افزایش عملکرد می‌شود (Bange *et al.*, 1997). بنابراین تعیین مناسب‌ترین زمان کشت این گیاه جهت افزایش تولید یا بهره‌وری مصرف آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی‌های صورت گرفته نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که تاریخ کشت در نقاط مختلف جهان نیاز به بهینه‌سازی دارد. محققین با انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای تاریخ کشت مناسب آفتابگردان را در برخی از مناطق کشور تعیین کرده‌اند. مظاهری‌لقب و همکاران (Mazaheri laqab *et al.*, 2011)، صفاری (Safari, 2006)، میرزایی و همکاران (Mirzaei *et al.*, 2012) و خواجه پور و سیدی (Khajehpour and Seyedi, 2000) به ترتیب تاریخ‌های ۳۰ فروردین را در قروه کردستان، نیمه دوم اردیبهشت در کرمان، ۲۰ خرداد در اسلام‌آبادغرب و ۷ اردیبهشت در اصفهان را به عنوان تاریخ کشت مناسب آفتابگردان در این مناطق پیشنهاد کردند. در دهه‌های اخیر مدل‌های متعددی از قبیل CERES، EPIC، WOFOST، CROPSYST و غیره برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب در خاک ارائه شده است که البته نیاز به واسنجی داشته و متغیرهای ورودی آنها نسبتا زیاد است (Momeni *et al.*, 2008). فائو در سال ۲۰۰۹، مدل شبیه‌سازی AquaCrop را بر اساس معادله دورنباس و کاسام و با اصلاحاتی روی آن ارائه نمود که محاسبات آن بر اساس گام روزانه می‌باشد (Steduto *et al.*, 2009). سیستم گیاه در مدل AquaCrop با پنج مؤلفه اصلی فنولوژی، تاج پوشش گیاهی، عمق ریشه‌دهی، تولید زیست‌توده و محصول قابل برداشت تعریف می‌شود. مدل AquaCrop که تکامل و توسعه یافته مدل Budget است، دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر بوده و با چهار جزء اساسی سر و کار دارد: خاک، گیاه (رشد، توسعه و عملکرد)، اتمسفر (رژیم حرارتی، بارش، نیاز تبخیری و غلظت دی‌اکسید کربن) و روابط بین بخشی شرایط محیطی، تنش‌ها و واکنش گیاه (Raes *et al.*, 2009). جنبه-های مفهومی و پایه‌ای مدل را استدیو و همکاران در سال ۲۰۰۹ (Steduto *et al.*, 2009) تشریح کرده‌اند و الگوریتم و نحوه استفاده از نرم‌افزار را رائس و همکاران در سال ۲۰۰۹ (Raes *et al.*, 2009; Ramezani, 2019) ارائه نموده‌اند. تودوروویک و همکاران (Todorovic *et al.*, 2009)، برای شبیه‌سازی رشد گیاه آفتابگردان تحت سناریوهای آبی در جنوب ایتالیا، سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST را با هم مقایسه نمود و طبق نتایج تحقیق، تفاوت قابل توجهی بین سه مدل مشاهده نشد، اما استفاده از مدل AquaCrop به دلیل نیاز به اطلاعات ورودی کمتر در شرایطی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد، پیشنهاد شد. ابراها و همکاران (Abrha *et al.*, 2012) کارایی مدل AquaCrop برای برآورد عملکرد و تعیین تاریخ کاشت مناسب پنج رقم جو در کشورهای آمریکا، ایتالیا، اتیوپی و سوریه بررسی کردند. بر پایه نتایج این بررسی، مدل AquaCrop، امکان برآورد مناسب عملکرد جو بر پایه داده‌های محدود محیطی را به خوبی داشت. از مدل AquaCrop در زیمبابوه (۲۰۱۴) برای تعیین تاریخ کاشت مناسب ارزن مرواریدی، سویا و آفتابگردان نیز استفاده شد (Dera *et al.*, 2014). در مطالعه‌ای دیگر از مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی WOFOST برای تعیین تاریخ کشت بهینه جو در منطقه ماهیدشت کرمانشاه استفاده شد ( Ahmadi and Farhadi Bansouleh, 2010). احمدپور (Ahmadpour, 2013) از مدل AquaCrop برای تعیین بهترین زمان کشت گیاه ذرت در کرمانشاه استفاده کرد و نتیجه گرفت که کشت گیاه در اواسط فروردین ماه (اوایل ماه آوریل) عملکرد بهتری را به همراه خواهد داشت. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی می‌توان اثر پارامترهایی که قابل تغییر هستند (از جمله تاریخ کشت) را بررسی و بهترین حالت آن پارامتر را جهت تولید بیشتر و یا افزایش بهره‌وری مصرف آب تعیین نمود. از آنجا که در استان کرمانشاه بعد از کشت غلات پاییزه (گندم و جو) گیاه آفتابگردان به عنوان کشت دوم در

فصل بهار به‌طور وسیع کشت می‌شود و با بررسی مطالعات فوق و اهمیت مدل AquaCrop در تعیین تاریخ کشت و توجه به این مهم که تاکنون تاریخ کشت بهینه و بهره‌وری آب و عملکرد گیاه آفتابگردان در استان کرمانشاه مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است، لذا این مطالعه با هدف بررسی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آفتابگردان (رقم فرخ) با استفاده از مدل AquaCrop در تاریخ کشت‌های مختلف در چهار شهرستان استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) انجام گردیده است.

## مواد و روش‌ها

### آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی با مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا اجرا گردید. در این منطقه متوسط بارندگی ۴۵۶ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بافت خاک مزرعه تحقیقاتی تا عمق ۶۰ سانتی‌متری رسی و از عمق ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری لوم رسی سیلتی می‌باشد. برخی از خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور تعیین تاریخ کشت مناسب برای آفتابگردان در منطقه کرمانشاه به کمک مدل AquaCrop، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با هشت تیمار (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰) درصد نیاز آبی واقعی در کل دوره رشد (به‌ترتیب تیمارهای T1، T2، T3 و T4) و تیمارهای ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره رویشی (به‌ترتیب T5 و T6) و ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره زایشی (به‌ترتیب T7 و T8) در سه تکرار انجام گردید. برای برآورد نیاز آبی گیاه آفتابگردان در طرح آزمایشی از داده‌های روزانه هواشناسی در زمان اجرای طرح (سال ۱۳۹۶) و فرمول پنمن- مانتیث فائو (Allen *et al.*, 1998) استفاده شد. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی خودکار مزرعه دریافت و مبنای محاسبات آبیاری قرارگرفتند. لازم به ذکر است که علت انتخاب تیمار ۲۰ درصد بیش‌آبیاری، عدم اطمینان کافی به روش تعیین نیاز آبی تیمار شاهد (با روش پنمن مانتیث فائو) در منطقه مورد مطالعه بود (Mansouri, 2016). دور آبیاری با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک هفت روز در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که جهت اطمینان از سبز شدن بذرها در مراحل اول رشد دور آبیاری کمتر از ۷ روز در نظر گرفته شد به طوری که تنش آبی به بوته‌ها وارد نشود. آب در اولین آبیاری (خاکاب) و مراحل بعد از آن تا قبل از استقرار کامل بوته‌ها به‌طور مساوی به کرت‌ها داده شد. با توجه به کوچک بودن طول مزرعه (۴ متر) و بسته بودن انتهای کرت‌ها، راندمان آبیاری برابر ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. حجم آب لازم جهت ورود به هر جویچه با توجه به نیاز ناخالص آبی و داشتن مساحت کرت‌ها، محاسبه گردید. از آبیاری هفتم به بعد که بوته‌ها به استقرار کامل (مرحله شش برگی) رسیدند، اعمال تیمارها آغاز گردید. به این صورت که بعد از محاسبه نیاز آبیاری برای تیمار شاهد، حجم آب لازم جهت آبیاری سایر تیمارها ضریبی از حجم آب لازم برای آبیاری تیمار شاهد در نظر گرفته شد. اساس محاسبه نیاز آبی تیمار شاهد برای مراحل پنجم تا هشتم آبیاری، نمونه‌برداری از خاک به تعداد سه تکرار و از دو عمق ۱۵ و ۴۵ سانتی‌متری (با توجه به گسترش و عمق ریشه در مراحل مذکور) قبل از انجام آبیاری، محاسبه درصد حجمی رطوبت در آن زمان و رساندن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی مزرعه بود. از آبیاری هفتم تا شانزدهم با استفاده از داده‌های هواشناسی و کاربرد رابطه پنمن مانتیث فائو نیاز آبی تیمار شاهد محاسبه گردید. اشاره به این نکته ضروری است که برای اعمال دقیق تیمارها، از مرحله شروع اعمال تیمارها، آبیاری با استفاده از شیلنگ و کنتور حجمی با دقت ۰/۱ لیتر انجام شد. کلیه مراحل کاشت، داشت و برداشت با نظارت مشاور زراعی طرح انجام گردید. به دلیل این که در مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی AquaCrop، تأثیر علف‌های هرز، آفات و سایر عوامل خارجی در نظر گرفته نشده است، به محض پیدایش علف هرز، وجین انجام می‌گرفت.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Soil physical characteristics of experimental farm

| ظرفیت زراعی<br>Field capacity ($m^3.m^{-3}$) | رطوبت نقطه پژمردگی<br>Permanent wilting point ($m^3.m^{-3}$) | رطوبت اشباع<br>Saturated moisture ($m^3.m^{-3}$) | هدایت هیدرولیکی<br>Hydraulic conductivity ($cm.hr^{-1}$) | بافت خاک<br>Soil texture | عمق خاک<br>Soil depth (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.42 | 0.22 | 0.55 | 0.42 | Clay | 0-30 |
| 0.42 | 0.22 | 0.55 | 0.42 | Clay | 30-60 |
| 0.43 | 0.23 | 0.52 | 0.50 | Silty clay loam | 60-90 |

### جمع‌آوری داده

برای واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای مدل، اندازه تاج پوشش گیاهی، وزن زیست توده و رطوبت خاک قبل از هر آبیاری (هر هفته) اندازه‌گیری شد. تاج پوشش گیاهی ازطریق گرفتن تصویر با استفاده از منوپاد از سطح فوقانی گیاهان در مراحل مختلف رشد و با استفاده از تحلیل تصویر گرفته شده در نرم‌افزار Arc-GIS با دقت مناسبی به دست آمد. در هر نمونه‌برداری، سه بوته از ردیف‌های نمونه‌برداری هر کرت برداشت شد. ساقه، برگ و دانه‌ها از هم جدا و پس از اندازه‌گیری سطح برگ گیاهان، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه در دستگاه آون قرار گرفتند و بعد از خشک شدن، وزن خشک ساقه، برگ و دانه اندازه‌گیری و مجموع وزن آنها به عنوان وزن زیست‌توده در نظر گرفته شد. قبل از هر آبیاری رطوبت خاک در اعماق ۱۵ و ۴۵ سانتی‌متری به روش وزنی (خشک کردن نمونه در آون) اندازه‌گیری شد.

### معرفی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop مدلی برای نشان دادن واکنش محصول نسبت به آب است، به این معنا که این مدل، رابطه بین میزان محصول تولیدی و تنش آبی که در اثر فقدان آب کافی به وسیله بارش یا آبیاری برای محصول در طول دوره رشد ایجاد شده را نشان می‌دهد. رابطه‌ای که هسته اصلی مدل AquaCrop را تشکیل می‌دهد (رابطه ۱)، به شرح زیر است:

$$B = Wp \times \sum Tr \qquad (۱)$$

که در آن B میزان زیست‌توده تولید شده بر حسب کیلوگرم، Wpبهره وری مصرف آب بر حسب کیلوگرم زیست‌توده تولید شده بر مترمربع بر میلی‌متر آب تجمعی مصرفی که در طی دوره رشد باعث تولید زیست‌توده شده و Tr تعرق گیاهی بر حسب میلی‌متر می‌باشد. این مدل رشد گیاه را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به سه دسته داده جهت اجرا نیاز دارد (Steduto *et al.*, 2009) که عبارتند از: داده‌های اتمسفری (مانند بارندگی، تعداد روزهای آفتابی، دمای حداکثر و حداقل و تبخیر)، داده‌های مربوط به گیاه (مانند فنولوژی، عمق ریشه و میزان ماده خشک) و داده‌های مربوط به خاک (مانند بافت خاک و میزان رطوبت اولیه خاک).

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مدل AquaCrop برای اجرا نیاز به فایل‌های هواشناسی، خاکشناسی، پارامترهای گیاهی و مدیریتی دارد. داده‌های روزانه هواشناسی از ایستگاه هواشناسی خودکار موجود در مزرعه تحقیقاتی اخذ و در قالب فایل‌های مورد نیاز به مدل معرفی گردید. فایل خاک با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی ایجاد گردید. برای هر کدام از تیمارهای آبیاری یک فایل آبیاری که حاوی تاریخ و عمق آب آبیاری بود در قسمت فایل‌های مدیریتی ایجاد شد. فایل گیاهی از مهم‌ترین فایل‌های مورد نیاز برای اجرای مدل می‌باشد و حاوی پارامترهای متعددی است که برخی از آنها امکان اندازه‌گیری در محل را نداشتند. در این شرایط پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری نیستند بایستی برآورد گردند. منظور از واسنجی مدل برآورد پارامترهای (گیاهی) مدل است به گونه‌ای که نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشد. در این مطالعه، مدل، بر اساس وزن زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک واسنجی گردید. فایل گیاهی واسنجی شده توسط منصوری (Mansouri, 2016) به عنوان فایل گیاهی اولیه برای مدل تعریف گردید. مدل بر اساس چهار تیمار (T1، T3، T6 و T7) واسنجی و بر اساس چهار تیمار دیگر (T2، T4، T5 و T8) صحت‌سنجی گردید.

### ارزیابی آماری مدل

برای ارزیابی نتایج مدل از آماره‌های شاخص سازگاری (d) و شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (روابط ۲ و ۳). در این روابط پارامترهای Oi ، Pi، $\overline{O}$، $\overline{P}$ و $n$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده، مقادیر شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و تعداد مشاهدات است.

شاخص سازگاری یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر هستند. مقدار این شاخص در حالت مطلوب یک می‌باشد و به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$d = 1 - \left[ \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n} \left( \left| P_i' \right| + \left| O_i' \right| \right)^2 \right]$$

$$0 \le d \le 1$$

$$O' = (O_i - \overline{O})$$

$$P' = (P_i - \overline{P}) \qquad (۲)$$

شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. این شاخص معیار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش بینی شده توسط یک مجموعه داده است و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد. مقدار آن به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (۳)$$

## اجرای مدل

مدل واسنجی شده برای شرایط آب و هوایی چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور در استان کرمانشاه اجرا گردید. در ابتدا برای هر ایستگاه یک فایل هواشناسی بر اساس داده‌های روزانه هواشناسی (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETo) در دوره مورد مطالعه (۲۰۱۷ – ۱۹۸۸) تهیه گردید. مقدار ETo با استفاده از رابطه پنمن–مانتیث (Allen *et al.*, 1998) محاسبه گردید. سپس فایل آبیاری به گونه‌ای تعریف گردید که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد و مدل برای محدوده‌ای از تاریخ کشت‌های رایج در منطقه (جدول ۲) اجرا و مقادیر عملکرد پتانسیل دانه و مجموع تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد برای هر اجرای مدل در یک فایل اکسل ذخیره گردید. ضمناً مقدار بهره‌وری مصرف آب نیز از تقسیم عملکرد دانه به تبخیر و تعرق کل گیاه محاسبه و به فایل نتایج اضافه گردید. در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده تاریخ کشت‌های بهینه برای رسیدن به حداکثر تولید و حداکثر بهره‌وری مصرف آب تعیین گردید.

**جدول ۲- محدوده تاریخ کشت مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف**

**Table 2- Range of studied cultivation date in various stations**

| ایستگاه هواشناسی<br>Weather Station | محدوده تاریخ کشت<br>Cultivation date range |
|---|---|
| کنگاور<br>Kangavar | ۱۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد<br>5 May – 15 June |
| کرمانشاه<br>Kermanshah | ۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد<br>25 April – 15 June |
| اسلام‌آبادغرب<br>Eslam Abad Gharb | ۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد<br>15 April – 15 June |
| سرپل‌ذهاب<br>Sarpol Zahab | ۲۵ اسفند تا ۳۱ فروردین<br>15 March – 20 April |

**جدول ۳- پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل AquaCrop برای آفتابگردان (رقم فرخ)**

**Table 3- Calibrated crop parameters of AquaCrop model for sunflower (Farokh cultivar)**

| پارامتر<br>Parameter | واحد<br>(Unit) | مقدار<br>Value | روش<br>Method |
|---|---|---|---|
| مدت زمان از کاشت تا جوانه زنی<br>(Duration from sowing to Emergence) | GDD[1] | 60 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| مدت زمان از کاشت تا آغاز پیری<br>(Duration from sowing to start senescence) | GDD | 1040 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| مدت زمان از کاشت تا رسیدن به بیشینه پوشش گیاهی<br>(Duration from sowing to maximum canopy) | GDD | 820 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| مدت زمان از کاشت تا شروع گلدهی<br>(Duration from sowing to flowering) | GDD | 640 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| طول دوره گل‌دهی<br>(Length of the flowering stage) | GDD | 200 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| دمای بالا<br>(Upper temperature) | °C | 30 | پیش فرض (Default) |
| دمای پایه<br>(Base temperature) | °C | 4 | پیش فرض (Default) |
| تعداد بوته در هکتار<br>(Number of plants per ha) | Plants/ha | 100000 | اندازه‌گیری شده (Measured) |
| بیشینه عمق موثر ریشه<br>(Maximum effective rooting depth) | cm | 80 | اندازه‌گیری شده (Measured) |

1- Growth Degree day

## نتایج و بحث

### واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک در طول دوره رشد در تیمارهای T1، T3، T6 و T7 واسنجی گردید. پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل به شرح جدول ۳ می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل واسنجی شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمارهای T2، T4، T6 و T8 انجام شد. در این مرحله پارامترهای گیاهی که در مرحله واسنجی تعیین شدند، بدون تغییر باقی مانده و مدل AquaCrop برای چهار تیمار دوم اجرا گردید و دقت مدل در شبیه‌سازی تاج پوشش گیاهی، زیست‌توده و رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های آماری برای پارامترهای زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج بیانگر این است که مدل، تمام تیمارها را در مرحله واسنجی با دقت خوبی شبیه‌سازی نمود. تیمارهای T1 و T6 در شبیه‌سازی زیست‌توده، تیمارهای T7، T6 و T3 در شبیه‌سازی تاج پوشش‌گیاهی و تیمارهای T3 و T7 در شبیه‌سازی رطوبت خاک با بیشترین میزان دقت، شبیه‌سازی شدند. نتایج مرحله صحت‌سنجی برای پارامترهای زیست‌توده و تاج پوشش گیاهی همانند مرحله واسنجی از دقت بالایی برخوردار بود، حال آن‌که دقت نتایج مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک در مرحله صحت‌سنجی به جز در تیمار T4 چندان بالا نبود.

### عملکرد دانه بر اساس تاریخ کاشت

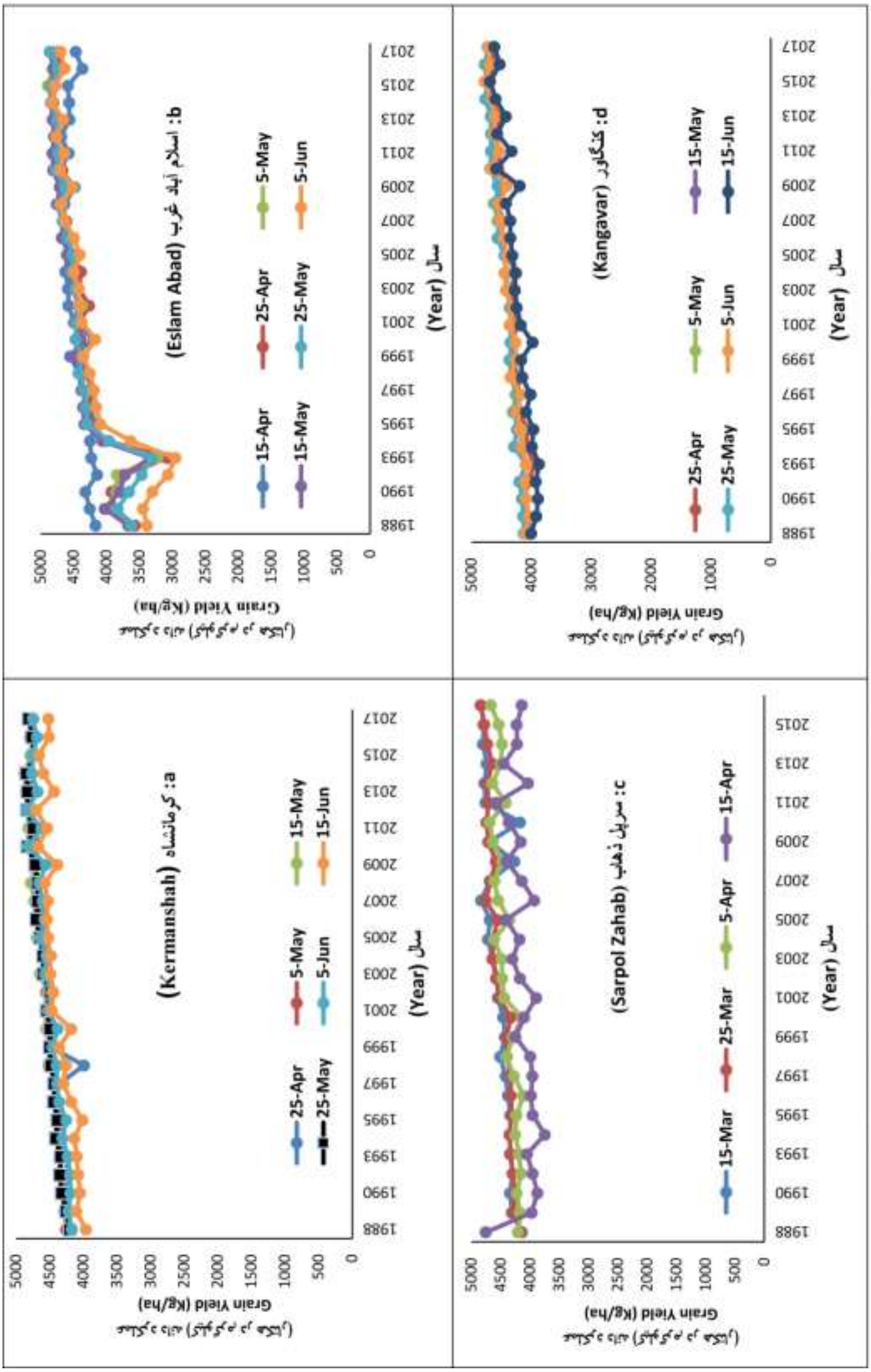
مدل واسنجی‌شده AquaCrop برای تاریخ کشت‌های مختلف و بر اساس داده‌های روزانه هواشناسی ۳۰ ساله (۱۹۸۸–۲۰۱۷) ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه اجرا گردید. مقادیر عملکرد دانه برآورد شده بر اساس تاریخ کشت‌های مورد بررسی و برای سال‌های مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان بیان کرد علی‌رغم نوسانات سالانه، عملکرد دانه با شیب اندکی روند افزایشی داشته است. با توجه به یکسان بودن فایل‌های خاک، گیاه و مدیریت آبیاری این تفاوت عملکرد ناشی از تغییرات پارامترهای هواشناسی می‌باشد. تغییرات پارامترهای هواشناسی (تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETo)، دمای هوا و دی‌اکسید کربن) در بازه زمانی مورد مطالعه نشان داد که در این مدت هر سه پارامتر هواشناسی روند افزایشی داشته‌اند. افزایش دما در دوره رشد با کاهش طول دوره همراه بوده و از طرفی افزایش میزان دی‌اکسیدکربن باعث افزایش میزان فتوسنتز و عملکرد گیاه می‌شود (Thompson *et al.*, 2017). با توجه به افزایش عملکرد به نظر می‌رسد که تأثیر مثبت افزایش میزان دی‌اکسیدکربن روی عملکرد دانه بیشتر از تأثیر منفی افزایش دمای هوا بوده است.

نتایج همچنین بیانگر تغییرات عملکرد دانه با توجه به تاریخ کشت در هر سال می‌باشد. میانگین عملکرد دانه، تبخیر و تعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب برای تاریخ کشت‌های مورد بررسی در ایستگاه‌های هواشناسی کرمانشاه، اسلام آباد غرب، سرپل ذهاب و کنگاور در جدول ۵ گزارش شده است. بیشترین میزان عملکرد دانه آفتابگردان در ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور به ترتیب برابر با ۴۵۸۵ کیلوگرم در هکتار (دهه سوم اردیبهشت)، ۴۴۴۱ کیلوگرم در هکتار (دهه دوم اردیبهشت)، ۴۵۲۲ کیلوگرم در هکتار (دهه اول فروردین) و ۴۳۷۴ کیلوگرم در هکتار (دهه دوم خرداد) به دست آمد که این تاریخ کشت‌ها با تاریخ کشت‌های واقعی در منطقه تقریباً مطابقت دارند. معمولا آفتابگردان در مناطق معتدل سرد مانند استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، کرمانشاه، خراسان شمالی، زنجان و همدان از دهه سوم فروردین تا ۱۵ خرداد می‌توان کشت می‌گردد، اما مناسب‌ترین تاریخ کاشت نیمه دوم اردیبهشت می‌باشد.

**جدول ۴- شاخص‌های آماری بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جهت واسنجی و صحت‌سنجی**

**Table 4- Statistical indicators between measured and simulated parameters for calibration and validation**

| مرحله<br>Phase | تیمار<br>Treatment | رطوبت خاک<br>Soil moisture | | تاج‌پوشش گیاهی<br>Crop Canopy | | زیست توده<br>Biomass | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | d | RMSE | d | RMSE | d | RMSE |
| Calibration | T1 | 0.80 | 45.4 | 0.91 | 13.3 | 1 | 0.5 |
| | T3 | 0.99 | 8.2 | 1 | 2 | 0.98 | 0.9 |
| | T6 | 0.94 | 22.9 | 0.96 | 1.2 | 1 | 0.3 |
| | T7 | 0.97 | 15.5 | 1 | 1.6 | 0.98 | 0.8 |
| Validation | T2 | 0.47 | 48.4 | 0.98 | 1.7 | 0.98 | 0.9 |
| | T4 | 0.97 | 17.3 | 0.95 | 10.6 | 0.97 | 0.7 |
| | T5 | 0.69 | 63.8 | 1 | 2.3 | 0.98 | 0.8 |
| | T8 | 0.49 | 131.6 | 1 | 0.5 | 0.99 | 0.4 |




شکل ۱- عملکرد دانه برآورد شده در تاریخ کشت‌های مختلف با مدل AquaCrop در ایستگاه‌های a) کرمانشاه، b) اسلام آباد غرب، c) سرپل ذهاب و d) کنگاور

Figure 1- Simulated grain yield under various sowing dates using AquaCrop in stations a) Kermanshah, b) Eslam Abad, c) Sarpol Zahab and d) Kangavar

جدول ۵- میانگین عملکرد دانه، تبخیروتعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه در تاریخ‌های مختلف کشت

**Table 5- Average grain yield, seasonal evapotranspiration and water productivity in the studied stations at different sowing dates**

| ایستگاه<br>Station | تاریخ کشت<br>Sowing date | عملکرد دانه<br>Grain yield ($kg.ha^{-1}$) | تبخیر و تعرق فصلی<br>Seasonal Evapotranspiration (mm) | بهره‌وری آب<br>Water Productivity ($m^3.kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| کرمانشاه<br>Kermanshah | 25 April | 4504 | 674 | 0.67 |
| | 5 May | 4564 | 670 | 0.68 |
| | 15 May | 4585 | 692 | 0.66 |
| | 25 May | 4563 | 686 | 0.67 |
| | 5 June | 4495 | 662 | 0.68 |
| | 15 June | 4359 | 630 | 0.69 |
| اسلام‌آباد<br>Eslam Abad | 15 April | 4328 | 606 | 0.71 |
| | 25 April | 4441 | 624 | 0.71 |
| | 5 May | 4412 | 630 | 0.70 |
| | 15 May | 4356 | 626 | 0.70 |
| | 25 May | 4204 | 604 | 0.70 |
| | 5 June | 3986 | 570 | 0.70 |
| سرپل‌ذهاب<br>Sarpol Zahab | 15 March | 4351 | 656 | 0.66 |
| | 25 March | 4522 | 644 | 0.70 |
| | 5 April | 4402 | 624 | 0.71 |
| | 15 April | 4146 | 584 | 0.71 |
| | 25 April | 3662 | 520 | 0.70 |
| کنگاور<br>Kangavar | 25 April | 4427 | 562 | 0.79 |
| | 5 May | 4408 | 564 | 0.78 |
| | 15 May | 4425 | 556 | 0.80 |
| | 25 May | 4374 | 534 | 0.82 |
| | 5 June | 4221 | 502 | 0.84 |
| | 15 June | 3978 | 490 | 0.81 |

همان‌طوری که از جدول هم مشخص است بیشترین عملکرد دانه مربوط به ایستگاه کرمانشاه بوده که به تناسب آن بهره‌وری آب حداکثر نبوده و نشان از مصرف آب بیشتری نسبت به ایستگاه کنگاور که حداکثر بهره‌وری به خود اختصاص داده است دارد. بیشترین میزان بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد دانه برای ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور به‌ترتیب ۰/۶۹کیلوگرم بر متر مکعب (دهه سوم خرداد)، ۰/۷۱کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم اردیبهشت)، ۰/۷۱ کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم فروردین) و ۰/۸۴کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم خرداد) به‌دست آمد. با توجه به این ارقام هرچند به نظر می‌رسد که عملکرد در این تاریخ‌های کشت کاهش یافته است ولی مقدار مصرف آب کاهش یافته و در نهایت منجر به افزایش مقدار بهره‌وری آب گردیده است. تغییرات این ارقام مربوط به عملکرد و بهره‌وری با توجه به تغییر تاریخ کشت در ایستگاه‌های مورد بررسی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق از نظر توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب با تحقیقات سایر محققین همخوانی دارد ( Dera *et al.*, 2014 ; Todorovic *et al.*, 2009).

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از مدل واسنجی‌شده AquaCrop، بر اساس آمار هواشناسی ۳۰ ساله برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) و برای چند تاریخ کشت مختلف انجام شده است. نتایج بیانگر این بود که با توجه به تغییرات پارامترهای هواشناسی در ۳۰ سال مورد بررسی، تاریخ کشت مناسب که منجر به بالاترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب می‌شود در مناطق مختلف متفاوت است. همچنین میزان عملکرد دانه در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی بوده است و بیش‌ترین مقدار عملکرد در شهرستان‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به ترتیب با کشت در دهه‌های اول فروردین، دوم اردیبهشت، سوم اردیبهشت و اول خرداد تولید می‌شود. نتایج تعیین تاریخ کاشت که منجر به حداکثر بهره‌وری مصرف آب می‌شود، نیز نشان داد که این تاریخ کشت با تاریخ کشت منجر به حداکثر عملکرد دانه متفاوت بوده و کشت تأخیری بالاترین بهره‌وری مصرف آب را دارد. با تأخیر در زمان کاشت و گرم شدن هوا طول دوره رشد کوتاه‌تر شده که معمولاً همراه با کاهش عملکرد و

تبخیروتعرق فصلی خواهد بود. با توجه به این‌که میزان کاهش این پارامترها یکسان نیست، زمانی که نسبت عملکرد به تبخیروتعرق فصلی بیشینه بود به عنوان تاریخ کشت مناسب برای این هدف تعیین گردید. بیش‌ترین مقدار بهره‌وری مصرف آب در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آبادغرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به ترتیب با کشت در دهه‌های دوم فروردین، اول اردیبهشت، سوم خرداد و دوم خرداد به‌دست می‌آید. در مجموع بیشترین عملکرد دانه مربوط به ایستگاه کرمانشاه بوده که به تناسب آن بهره‌وری آب حداکثر نبوده و نشان از مصرف آب بیشتری نسبت به ایستگاه کنگاور که حداکثر بهره‌وری به خود اختصاص داده است دارد. این مورد بیانگر این نکته است که ممکن است با افزایش عملکرد میزان بهره‌وری آب افزایش پیدا نکند. هر چند که این تحقیق در مورد عملکرد دانه و میزان بهره‌وری در تاریخ‌های بهینه کشت آفتابگردان انجام شده است اما کارایی این مدل منحصر به این موارد نیست و این مدل ابزاری توانمند به منظور اعمال مدیریت‌های مختلف آب و خاک و گیاه می‌باشد.

## منابع


1. Abrha B., Delbecque N., Raes D., Tsegay A., Todorovic M., Heng L., and Deckers S. 2012. Sowing strategies for barley (Hordeum vulgare L.) based on modeled yield response to water with AquaCrop. Experimental Agriculture 48(02): 252-271. https://doi.org/10.1017/S0014479711001190.
2. Ahmadi M., and Farhadi Bansouleh B. 2010. The effect of germination date on barley yield in Mahidasht region of Kermanshah using WOFOST plant growth simulation model. The first international conference on plant, water, soil and air modeling. Kerman, Iran. (In Persian)
3. Ahmadpour A. 2013. Predicting corn crop yield under different irrigation managements using WOFOST and AquaCrop models in Kermanshah region. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
4. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO, Irrigation and Drainage Paper No.56.
5. Bange M.P., Hammer G.L., and Rickert K.G. 1997. Environmental control of potential yield of sunflower in the subtropics. Australian Journal of Agriculture Research 48: 231- 240. https://doi.org/10.1071/A96079.
6. Dera J., Mpofu L.T., and Tavirimirwa B. 2014. Response of pearl millet varieties to different dates of sowing at Makoholi and Kadoma research stations, Zimbabwe. Academia Journal of Agricultural Research 2(4): 110-113. http://dx.doi.org/10.15413/ajar.2014.0116.
7. Farahani H.J., Gabriella I., and Oweis T.Y. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. Agronomy Journal 101 (3): 469–476. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s.
8. Khajehpour M.R., and Seyedi F. 2000. Effect of planting date on components and seed and oil yield of sunflower cultivars. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources 4(2): 117-127. (In Persian)
9. Khaleghi M. 2019. Evaluation of the sunflower yield, water productivity and soil salinity simulation under water and salinity stresses using the AquaCrop model. Journal of Water and Soil Resources Conservation 8(2): 15-37. (In Persian with English abstract)
10. Khichar M.L., and Niwas R. 2006. Microclimatic profiles under different sowing environments in wheat. Journal of Agro Meteorology 8: 201-209. https://doi.org/10.54386/jam.v8i2.1048.
11. Mansouri M. 2016. Spatial variation of sunflower yield under deficit irrigation regimes using AquaCrop-GIS model. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
12. Mazaherilaqab H., Salavati S., and Mahmoudi R. 2011. Reaction of sunflower yield (*Helianthus annuus* L.) of Armavirski cultivar to the date and density of cultivation in dry land conditions of Qorveh, Kurdistan. Crop Production Technology 3(2): 63-74. (In Persian with English abstract)
13. Mirzaei Z., Berari M., Rezaei zad A., and Mehrabi A.SH. 2012. Effect of planting date on growth indices of new sunflower hybrids (*Helianthus annuns* L.) in the cold temperate region of Kermanshah. Journal of Crop Physiology 4(13): 5-20. (In Persian with English abstract)
14. Mohammadi M., Ghahraman B., Davary K., Ansari H., and Shahidi A. 2015. Validation of AquaCrop model for simulation of winter wheat yield and water use efficiency under simultaneous salinity and water stress. Journal of Water and Soil 29(1): 67-84. (In Persian with English abstract)
15. Momeni R., Behbahani M.R., Montazer A.A., and Nazarifar M.H. 2008. Application of CropSyst plant growth model to investigate management analyzes of increasing wheat water consumption productivity. second national conference on irrigation and drainage networks management, Shahid Chamran Irrigation and Drainage Network of Ahvaz. (In Persian)
16. Oiganji E., Igbadun H.E., Mudiare O.J., and Oyebode M.A. 2016. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. Agriculture Engineering International CIGR Journal 18(3): 1-13.
17. Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: reference manual annexes. Agronomy Journal 101(3): 426-437.

https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s.
18. Ramezani M., Babazadeh H., and Sarai Tabrizi M. 2019. Simulating barley yield under different irrigation levels by using AquaCrop model. Irrigation Sciences and Engineering (JISE) 41(4): 161-172. (In Persian with English abstract)
19. Rao N.K., Gadgil S., Rao S.P., and Savithri K. 2000. Tailoring strategies to rainfall variability-The choice of the sowing window. Current Science 78(10): 1216-1230.
20. Safari M. 2006. Effects of planting date on seed yield, and yield components of six sunflower cultivars in Kerman. Pajouhesh Va Sazandgi 144: 73-139. (In Persian with English abstract)
21. Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal 101: 426–437. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s.
22. Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M., Stockle C., and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal 101: 509–521. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s.
23. Thompson M., Gamage D., Hirotsu N., Martin A., and Seneweera S. 2017. Effects of Elevated Carbon Dioxide on Photosynthesis and Carbon Partitioning: A Perspective on Root Sugar Sensing and Hormonal Crosstalk. Frontiers in Physiology 8(578): 1-13. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00578.